

Módulo Posterior para la Integración de Polarímetros Multi-Pixel a 40 GHz en Radioastronomía

Juan L. Cano, Enrique Villa, José V. Terán, Ana R. Pérez, Luisa de la Fuente, Angel Mediavilla, Eduardo Artal

canojl@unican.es, villae@unican.es, teranjv@unican.es, ana.perez.quintanilla@gmail.com, fuenterm@unican.es, angel.medivilla@unican.es, artale@unican.es

Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones. Universidad de Cantabria. Plaza de la Ciencia s/n, 39005 Santander.

Abstract- This work presents the design and future integration of the back-end module for the 40 GHz instrument of the QUIJOTE project, which is a project aimed to the measurement of the Cosmic Microwave Background's polarization. This contribution focuses on the importance of the concept of modularity in order to facilitate the integration tasks and to enable the assembly of a high number of receivers (pixels) in the instrument, which improves the overall sensitivity. Performance measurements of each individual subsystem are provided and the foreseen whole integration in a metallic rack is presented.

I. INTRODUCCIÓN

El estudio de la polarización del fondo cósmico de microondas (CMB, por sus siglas en inglés, Cosmic Microwave Background) ha cobrado gran interés en los últimos años entre la comunidad astrofísica ya que promete ofrecer información muy valiosa sobre la prueba principal que sustenta la teoría del Big-Bang. Tras la caracterización detallada de las anisotropías en la intensidad del CMB llevada a cabo por proyectos como COBE [1], WMAP [2] o Planck [3], el estudio en profundidad de la polarización permitiría detectar las ondas gravitacionales y dar una explicación completa del periodo inflacionario, el cual se sitúa unos 379.000 años después del Big-Bang. Entre los proyectos que persiguen la medida de la polarización del CMB cabe citar BICEP2 [4] y QUIJOTE [5] que es una colaboración internacional liderada desde España y que propone, entre otros objetivos singulares, medir dicha polarización en tres rangos de frecuencia diferentes con tres instrumentos distintos.

La característica común entre los receptores de todos estos proyectos es la enorme sensibilidad que deben tener, ya que las potencias que tienen que detectar son mínimas. Se

estima que la amplitud de los *modos B*, uno de los tipos de polarización del CMB directamente relacionado con la densidad de las ondas gravitacionales, es como mucho de $0.1 \mu\text{K}$ [6]. El fallido anuncio de la detección de las ondas gravitacionales por parte de BICEP2 en 2015 [7] da muestra de la dificultad de medir este tipo de parámetros. Por tanto, el objetivo principal que se persigue en el diseño de instrumentos receptores para polarimetría en radioastronomía es la maximización de la sensibilidad de dichos instrumentos.

Existen varias formas de mejorar la sensibilidad de un radiómetro independientemente de su configuración, las cuales emanan de la ecuación básica de la sensibilidad del mismo (1).

$$\Delta T = K \cdot \frac{T_{\text{sys}}}{\sqrt{B \cdot \tau \cdot N}} \quad (1)$$

donde K es una constante que depende de la configuración del receptor, T_{sys} es la temperatura de ruido del sistema, B es el ancho de banda del mismo, τ es el tiempo de integración, y N es el número de receptores (píxeles) del instrumento.

Este trabajo pretende dar una visión sobre la forma modular en la que se ha diseñado y se pretende integrar el módulo posterior del instrumento de 40 GHz (FGI, por sus siglas en inglés, Forty-Gigahertz Instrument) del experimento QUIJOTE, cuyo esquema de receptor se muestra en la Fig. 1. La integración persigue maximizar el número de píxeles (N) que se pueden incluir físicamente y así mejorar su sensibilidad. Los elementos que componen el módulo frontal del instrumento de 30 GHz (TGI), similares a los diseñados para el FGI, se han mostrado en comunicaciones anteriores [8], [9].

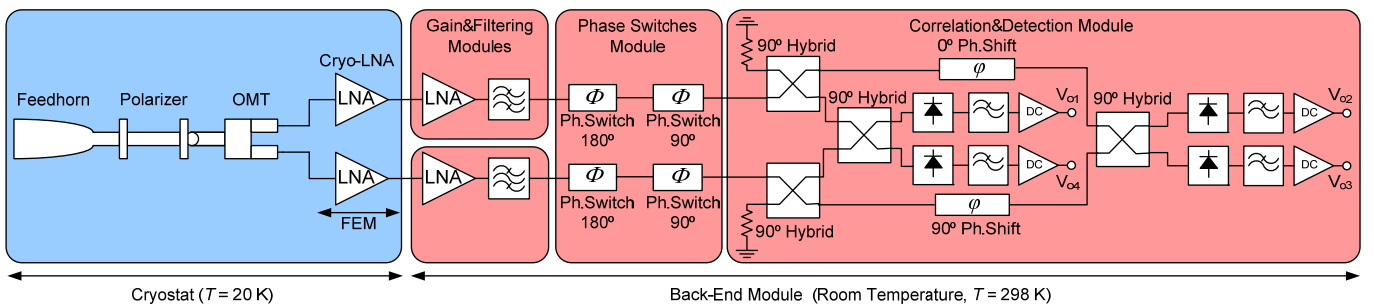


Fig. 1. Esquema del receptor (pixel) del instrumento de 40 GHz (FGI) para el experimento QUIJOTE.

II. DISEÑO DEL MÓDULO POSTERIOR

El número de receptores o píxeles que se instalan en un instrumento depende principalmente de la cantidad de ellos que se pueden alojar en el plano focal de la antena del mismo. Sin embargo, también es conveniente que los módulos posteriores de estos píxeles ocupen el mínimo tamaño posible y además, para facilitar su instalación y recambio, han de tener una arquitectura modular.

En el caso de los receptores del FGI (banda 35 – 47 GHz), y aprovechando la experiencia adquirida durante el desarrollo del TGI, se han diseñado todos los módulos que componen el módulo posterior por separado para luego ser ensamblados sobre una placa de circuito impreso (PCB), la cual se encarga de distribuir todas las señales de DC necesarias, tal y como se muestra en la Fig. 2.

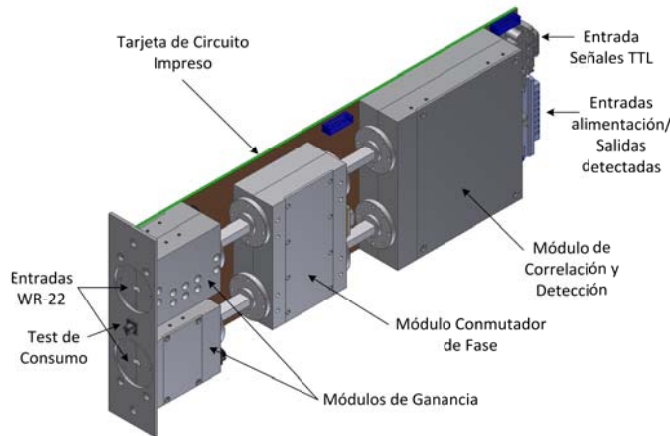


Fig. 2. Imagen artística del ensamblaje de cada receptor a modo de tarjeta.

Cada uno de los receptores, integrado en una tarjeta, es totalmente autónomo y puede ser fácilmente instalado y reemplazado del rack donde opera. Se detallan a continuación las características principales de cada uno de los subsistemas que componen cada receptor.

A. Módulo de Ganancia

La primera etapa del módulo posterior requiere de ganancia, para minimizar la contribución de las etapas posteriores al ruido total del sistema, y filtraje que permita definir el ancho de banda del receptor. Como se puede ver en la Fig. 1 y Fig. 2, esto se lleva a cabo con dos módulos independientes, uno por rama. La idea detrás de separar ambas ramas en este punto es simplificar el diseño de aquellos módulos que llevan componentes de alta ganancia, los cuales pueden dar problemas una vez montados.

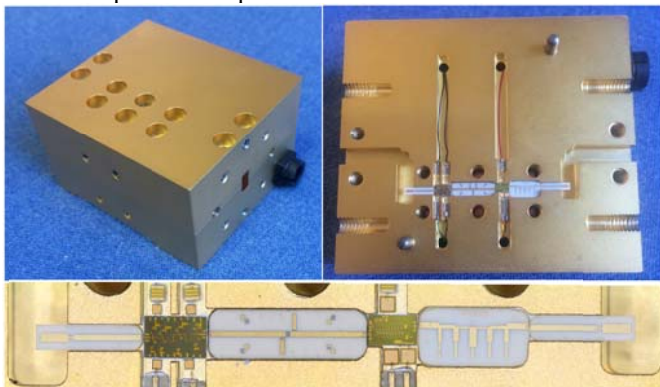


Fig. 3. Fotografías de una unidad del módulo de ganancia y filtraje.

En la Fig. 3, donde se presentan diferentes fotografías del módulo de ganancia, se pueden apreciar bastantes de los detalles de diseño del mismo. Se han utilizado dos amplificadores de bajo ruido monolíticos, modelos CGY2122XUH de OMMIC el primero y HMC1126 de Hittite el segundo, para proporcionar el nivel de ganancia adecuado. Entre ambos chips se ha diseñado un ecualizador en tecnología microstrip sobre alumina el cual nos va a permitir definir una pendiente positiva en la curva de ganancia del módulo. Esta pendiente positiva es necesaria para compensar las mayores pérdidas con la frecuencia que presentan otros subsistemas y así intentar obtener una respuesta plana. Finalmente, tras el segundo chip, se ha colocado un filtro paso banda (35 – 47 GHz) en tecnología microstrip sobre alumina para definir en gran medida el ancho de banda del sistema. La Fig. 4 muestra los resultados medidos de este módulo.

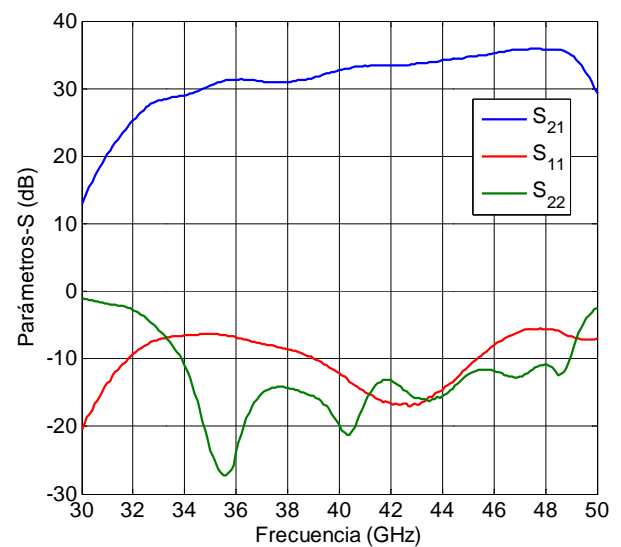


Fig. 4. Resultados medidos del módulo de ganancia y filtraje. Ganancia en trazo azul, adaptación de entrada en trazo rojo y adaptación de salida en trazo verde.

El módulo se alimenta con tensiones de ± 5 V y tiene un consumo aproximado total de 110 mA.

B. Módulo Conmutador de Fase

El módulo conmutador de fase está formado por un módulo único que contiene dos ramas idénticas, para realizar los cambios de fase requeridos en cada una ellas. El módulo proporciona cuatro estados de fase (0° , 90° , 180° y 270°) en cada una de sus ramas, haciendo que en total cada píxel del receptor pase por 16 estados de fase.

El circuito conmutador de fase está diseñado en tecnología microstrip e integrado en un chasis con accesos en guía de onda WR22, en un sustrato de alumina con capa resistiva de $50 \Omega/\text{cuadro}$. El circuito se basa en la división y posterior combinación, a través de divisores tipo Wilkinson, de dos ramas que presentan una diferencia de fase fija entre ellas de 90° y que son capaces, cada una de ellas, de alternar su fase $0^\circ/180^\circ$ a través del uso de diodos PIN HPND-4005. El módulo se alimenta con tensiones de ± 5 V, con un consumo aproximado total de 80 mA por estado, siendo necesarias cuatro señales TTL de control para los estados del módulo proporcionadas a través de la utilización de drivers DR65-0109. En la Fig. 5, se observan dos fotografías del módulo desarrollado, así como un detalle del montaje del

circuito dentro de la caja. La Fig. 6 muestra la respuesta medida para las diferencias de fase respecto a un estado de referencia del módulo.

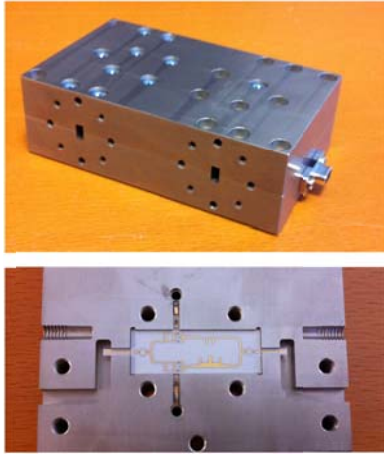


Fig. 5. Fotografías de una unidad del módulo de conmutación de fase.

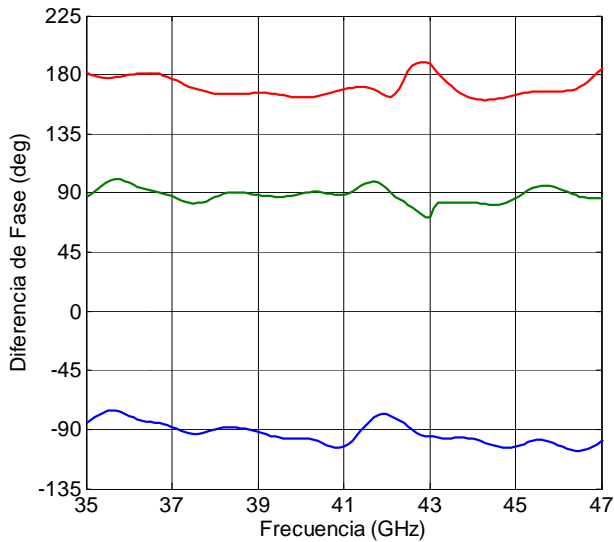


Fig. 6. Resultados medidos de la diferencia de fase entre estados del módulo conmutador de fase.

C. Módulo de Correlación y Detección

Este módulo realiza primeramente la correlación entre las señales de entrada, es decir, las suma y resta aplicando diferentes desfases, y el resultado de estas operaciones es detectado posteriormente por detectores a diodo Schottky diseñados en tecnología microstrip sobre alúmina [10]. Una vez detectadas, las señales son amplificadas utilizando amplificadores operacionales configurados de tal forma que proporcionan salidas diferenciales. Las tareas de correlación son llevadas a cabo por acopladores híbridos 3 dB. La división de señales a la entrada del módulo también se realiza con acopladores híbridos 3 dB cuya rama aislada ha sido terminada con una carga absorbente en guía de onda. Se han elegido estos acopladores en vez de divisores de tres puertos clásicos porque ofrecen mejores resultados de aislamiento. Para el diseño del módulo se ha optado por tecnología en guía de onda que ofrece buenas prestaciones con gran repetitividad y mínimas pérdidas de inserción. Además, se ha buscado una configuración que persiga la simetría en la estructura, lo cual ayuda a mejorar el comportamiento general del módulo. El diseño y caracterización del prototipo

de este módulo se presentó en [11]. Aunque la versión actual ha sido ligeramente mejorada, los detalles del diseño de sus componentes en guía de onda permanecen inalterados. La Fig. 7 muestra la fotografía de uno de los módulos de correlación montados y medidos hasta el momento.

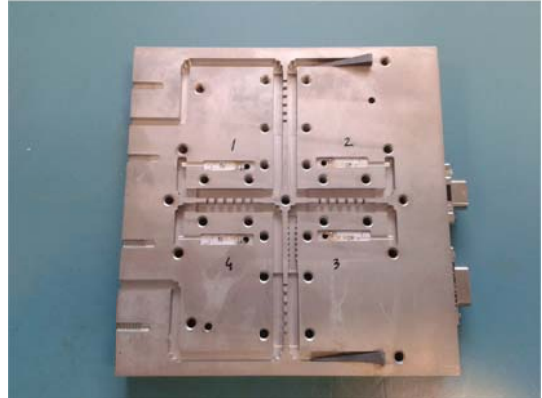


Fig. 7. Fotografía del módulo de correlación y detección. La amplificación de las señales detectadas se realiza en la parte posterior del módulo.

La caracterización de este módulo se ha realizado introduciendo dos señales en sus puertos de entrada con la misma amplitud y desfasadas 90° , dada la disponibilidad de un acoplador híbrido 3 dB en un módulo a parte que nos permite obtener estas señales a su salida. El correcto funcionamiento del módulo de correlación y detección se muestra en la Fig. 8 donde las señales detectadas teóricas son 0, V_o , $V_o/2$ y $V_o/2$ en el ancho de banda de diseño, 35 - 47 GHz.

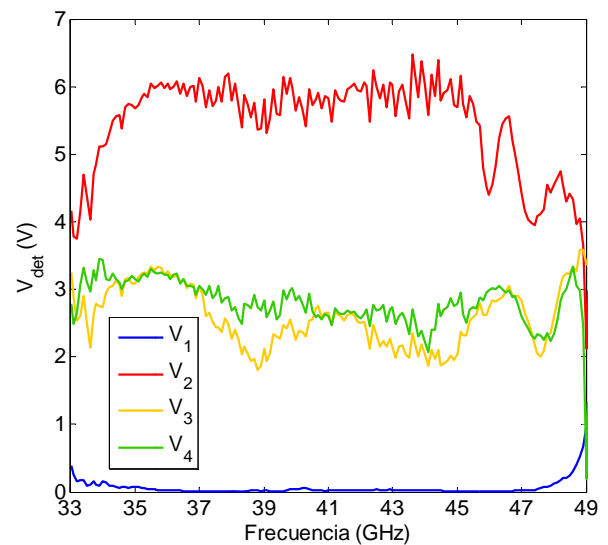


Fig. 8. Tensiones detectadas medidas a la salida de uno de los módulos de correlación.

D. Integración

Como se ha comentado anteriormente, todos los subsistemas se ensamblan en un PCB tal y como se muestra en la Fig. 2. De esta forma, cada receptor o pixel obtiene las cuatro señales detectadas que permiten calcular los parámetros de Stokes que definen la polarización de la señal que entra al sistema. Se puede demostrar que los parámetros de Stokes se obtienen operando las señales detectadas mediante las ecuaciones (2) – (4). El parámetro de Stokes V no se calcula pues se asume que el CMB no tiene componente circular.

$$I = |E_l|^2 + |E_r|^2 \propto V_{o1} + V_{o4} = V_{o2} + V_{o3} \quad (2)$$

$$Q = 2\text{Re}(E_l^* \cdot E_r) \propto V_{o1} - V_{o4} \quad (3)$$

$$U = -2\text{Im}(E_l^* \cdot E_r) \propto V_{o2} - V_{o3} \quad (4)$$

La tarjeta de circuito impreso proporciona las señales de alimentación a los diferentes módulos así como las señales TTL que controlan los estados del módulo de conmutación. Estas señales TTL son introducidas a través de un conector independiente para minimizar el ruido que pueda causar en las mismas la coexistencia con otro tipo de señales. Como únicas salidas, el PCB proporciona las tensiones detectadas en modo diferencial. Finalmente, el PCB incluye un pequeño circuito para medir la corriente que alimenta los módulos de ganancia. Este parámetro se puede comprobar desde fuera mediante un simple multímetro, lo cual ofrece la capacidad de detectar algunos fallos comunes en el sistema.

Una vez que todos los módulos necesarios están ensamblados y medidos se integran como se muestran en la Fig. 2 para caracterizar su funcionamiento como sistema completo. El receptor se completa con el resto de elementos diseñados dentro del proyecto: una antena de bocina corrugada, un polarizador en guía de onda cuadrada y un transductor ortomodo basado en unión turnstile. Detalles de elementos similares a estos en banda Ka se pueden encontrar en [8]. Para alimentar este receptor se utiliza una fuente de ruido que proporciona una señal de banda ancha, la cual se amplifica con un LNA que cubre la banda y se emite utilizando una antena de bocina comercial en banda Q con entrada en guía rectangular que proporciona la polarización lineal. El módulo conmutador de fase se hace conmutar a una frecuencia de 16 Hz de tal forma que en un segundo de toma de datos se obtienen las salidas para los 16 estados posibles. La Fig. 9 muestra las tensiones detectadas en un segundo de tiempo.

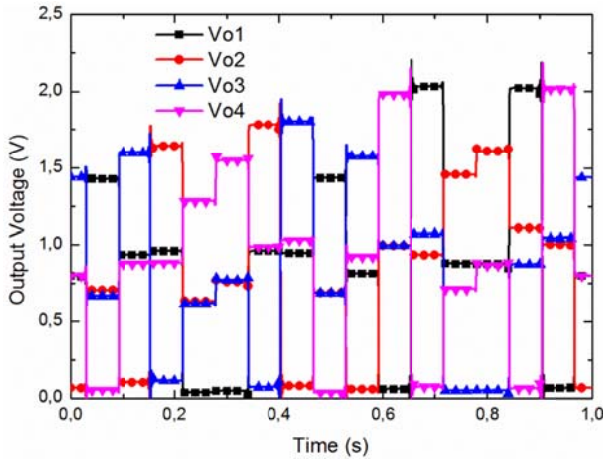


Fig. 9. Voltajes detectados a la salida del módulo posterior para los 16 estados del módulo conmutador.

Como se puede ver en la Fig. 9, los resultados obtenidos son los esperados teniendo en cuenta la respuesta analizada en la Fig. 8. Las variaciones en las amplitudes son debidas a las diferencias de pérdidas de inserción entre los estados del módulo de conmutación, mientras que los pequeños desequilibrios entre las tensiones medias son debidos a errores de fase entre las ramas de todo el sistema. Estos errores son pequeños y no presentan mayor problema durante el proceso de calibración posterior del sistema.

Una vez que el pixel está integrado y caracterizado se procederá al ensamblado del mismo dentro de un rack metálico de tamaño estándar (19" y 3U de altura). Este rack permite la integración de diez pixeles tal y como se muestra en la visión artística del montaje de la Fig. 10. Para completar el instrumento del FGI serán necesarios tres racks como este ya que el número final de pixeles en el plano focal es de 30.

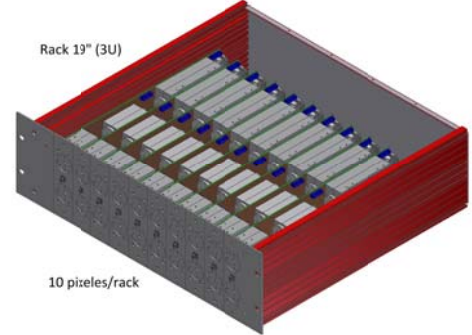


Fig. 10. Visión artística de la integración de 10 receptores en un rack.

III. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta el diseño e integración del módulo posterior para el instrumento de 40 GHz del experimento QUIJOTE, incidiendo en la característica de modularidad necesaria para integrar un gran número de receptores, lo cual permite mejorar la sensibilidad del polarímetro. Se muestran detalles de diseño y resultados experimentales de cada uno de los subsistemas que componen el receptor, así como de todo el módulo posterior, donde se pueden observar resultados prometedores.

AGRADECIMIENTOS

Los desarrollos de este trabajo se han financiado con la ayuda del Ministerio de Economía y Competitividad, Programa CONSOLIDER-Ingenio 2010 de referencia CSD2010-00064.

REFERENCIAS

- [1] science.nasa.gov/missions/cobe/
- [2] map.gsfc.nasa.gov/
- [3] www.cosmos.esa.int/web/planck
- [4] www.cfa.harvard.edu/CMB/bicep2/
- [5] www.epi-consolider.es/
- [6] es.wikipedia.org/wiki/Radiación_de_fondo_de_microondas
- [7] www.nature.com/news/gravitational-waves-discovery-now-officially-dead-1.16830
- [8] J. L. Cano, A. Mediavilla, E. Artal, R. Hoyland, "Sistema de Alimentación de Antena en Guía de Onda y Banda-Ka para Aplicaciones de Polarimetría", XXVII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, URSI 2012, Elche, 12-14 septiembre, 2012.
- [9] E. Artal, B. Aja, J. L. Cano, L. de la Fuente, J. V. Terán, E. Villa, "Amplificadores criogénicos de muy bajo ruido en microondas y ondas milimétricas", XXX Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, URSI 2015, Pamplona, 2-4 septiembre, 2015.
- [10] E. Villa, B. Aja, L. de la Fuente, E. Artal, "Detector basado en diodo Schottky en la banda de 35 a 47 GHz", XXVII Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, URSI 2012, Elche, 12-14 septiembre, 2012.
- [11] A. R. Pérez, J. L. Cano, E. Villa, A. Mediavilla, E. Artal, "Módulo de Correlación y Detección de Banda Ancha y Banda Q en Guía de Onda", XXIX Simposium Nacional de la Unión Científica Internacional de Radio, URSI 2014, Valencia, 3-6 septiembre, 2014.